

文章编号: 0253-9993(2011)08-1334-08

气象条件对地下煤火浅层温度的影响

刘晓晨^{1 2 3} 武建军^{1 2 3} 刘 明^{1 2 3} 蒋卫国^{1 2 3} 顾 磊⁴

(1. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学 民政部/教育部 减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 3. 北京师范大学 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 4. 首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100037)

摘 要: 选择内蒙古乌达煤田火区中的 18 号火区作为研究区域, 对浅层测温数据进行分析研究, 分别量化分析了降水量、气温、风速 3 个气象要素与地下煤火浅层温度在时空上的变化趋势及它们之间的关系。结果表明: 降水量是影响地下煤火浅层温度变化的重要因素, 大的降水过程可达到降低煤火浅层温度的效果; 气温的日变化对于地下煤火的影响只限于表层, 季节性变化影响的深度更大; 风速与地下煤火之间在短期内并没有直接的作用关系, 但它会影响到火区的通风供氧与煤火信息的提取。

关键词: 地下煤火; 地表浅层温度; 降水量; 气温; 风速

中图分类号: TD752

文献标志码: A

Effect of local meteorological conditions on shallow subsurface temperature above underground coal fire

LIU Xiao-chen^{1 2 3}, WU Jian-jun^{1 2 3}, LIU Ming^{1 2 3}, JIANG Wei-guo^{1 2 3}, GU Lei⁴

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, MOCA/MOE, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Key Laboratory of Environment Change and Natural Disaster, MOE, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. Resource Environment & Tourism College, Capital Normal University, Beijing 100037, China)

Abstract: Fire zone 18 of Wuda coalfield in Inner Mongolia was selected as the study area. Variation series of temperature measured on spatial and vertical layers of ground subsurface was analyzed, as well as three meteorological factors as precipitation, air temperature and wind speed; meanwhile, correlation between the measurement temperature and meteorological factors were quantitative analyzed. Preliminary conclusions are drawn as: precipitation is a significant factor to underground coal combustion, heavy rainfall may get to the burning center to decrease temperature, and long-term rich precipitation can, to a certain extent, suppress combustion; effects of air temperature on underground coal fire is limited to the surface, but the seasonal variation can far deeply influence the vertical temperature above fire; wind speed didn't show any directly effect on coal fire in short term, while the local wind condition is very probable to affect the combustion system and the information extraction of underground coal fire.

Key words: underground coal fire; shallow subsurface temperature; rainfall; air temperature; wind speed

地下煤火是在自然条件下或受人类活动的影响, 地下煤层或煤层露头与氧气接触后, 从氧化自燃到剧烈燃烧后形成一定的规模, 并产生系列环境、生态影响的煤层燃烧现象^[1-3]。工业革命以来, 由于人类采

矿活动的加强, 地下煤火在全球泛滥。但迄今为止, 多数的国家或地区并没有设立专门的机构进行地下煤火研究与治理, 导致火区勘察与统计的数据库不完善, 更新不及时^[1, 4-5], 给煤火的研究与治理造成极大

收稿日期: 2010-10-21 责任编辑: 毕永华

基金项目: 国际科技合作重点资助项目(2007DFA90500)

作者简介: 刘晓晨(1984—), 男, 内蒙古武川人, 博士研究生。Tel: 010-58802283, E-mail: liuxc2009@gmail.com。联系人: 武建军(1971—), 男, 博士生导师。E-mail: jjwu@bnu.edu.cn

的不便。据不完全统计,美国11个州在2005年的地下煤火就有141处^[6-7];欧洲包括英国、法国、德国、捷克及东欧的俄罗斯等国均有煤火分布^[8-10];非洲的煤火主要发生于南非等国^[11]。亚洲则主要分布在印度、中国,与东南亚的越南、泰国、印度尼西亚等地。其中,印度的煤火燃烧区域超过700 km²^[6];中国的地下煤火主要发生于北方地区的13个省市中,其中新疆、内蒙古与宁夏等地较为严重^[1,3]。

地下煤火吞噬大量宝贵的煤炭资源,严重影响原煤的开采进程与采矿安全^[2,12],对火区附近的基础建设与人居安全构成极大的威胁;燃烧释放出热量与SO₂、H₂S、CO等毒害气体严重污染了生态与大气环境,并危害着人类健康^[13]。此外,燃烧所释放的大量CO₂、CH₄等气体^[5]在全球温室气体减排中不容忽视。

地下煤火的燃烧受到煤质、煤层地质构造条件与当地气候条件等影响因素的制约^[14]。其中,气候条件是煤火发生发展非常重要的外部自然因素,如在我国的中西部地区,干燥的气候环境为地下煤火的滋生与发展提供了有利的条件^[1,3],所以在进行地下煤火燃烧机理的研究时,有必要进一步研究并量化气候气象条件与地下煤火燃烧及温度变化的关系。目前,地下煤火探测主要是通过地面勘察、物探手段、钻探手段与遥感技术结合完成的^[1],随着卫星传感器分辨率的改善与地理信息技术的发展,遥感技术凭借其可快速、大面积、多时相监测等特点将成为地下煤火监测方法中的首选,且目前已多有应用^[15-17]。但地下煤火不同于森林火灾或火山火,尤其是深层地下煤火在地表的热异常信息相对微弱,且在信息提取时会受到局地气象条件如气温、水汽含量、风的影响,增大了监测结果的不确定性^[18-19](据S. Stefan,乌达煤田18号火区测温原数据的校正报告,2009)。基于上述两点,本文拟分析研究气候气象条件与地下煤火地表浅层测温之间的关系,量化局地气象条件对地下煤火地表浅层温度的影响程度,为有效剥离煤火浅层温度信息中气象因素的趋势、准确监测煤火的燃烧状况奠定了基础;同时为运用遥感技术进行煤火地表信息的准确提取与量化时,减小气象因素影响做好了铺垫工作。

1 研究区域与数据

1.1 研究区域

乌达煤田火区位于内蒙古乌达矿区,地理坐标为东经106.60°~106.67°,北纬39.479°~39.575°,面积为35 km²,为内蒙古自治区乌海市所辖,东邻黄河,西接巴丹吉林大沙漠。境内降水稀少,蒸发量比

同期降雨量大6~9倍,昼夜温差极大,风力强劲^[20]。火区面积为3.076 km²,在过去的40 a共有1 800万t煤炭被烧失^[21]。近年来由于开采力度加大,小煤窑泛滥,火区已成一片火海^[3]。目前火区仍在持续燃烧,严重威胁着矿区的生态环境与附近居民的身体健康。本文选择18号火区作为实验区,该火区同时也是中德煤火合作项目于2008—2009年所设立的针对地下煤火燃烧研究、探测与监测的实验区。18号火区面积约为0.16 km²,火区内燃烧剧烈,且有大量的烟气排出。

1.2 数据

火区的地表浅层测温数据由中德煤火合作项目研究组于2008年开展中德联合野外实验过程中采集,时间序列为2008-05-26—10-06。实验的设计者为德国宇航中心(DLR)与德国联邦地球科学与资源研究所(BGR)^[22]。气象数据包括与测温同期的以小时为单位的气温、风速数据,以日为单位的降水量数据(气象站距火区约20 km)。

本文选择浅层钻孔中的高温中心点(位于火区中心,深度为40 cm)、普通高温点(深度为36 cm)(统称为高温样本点)与背景点(深度为44 cm)作为火区浅层温度空间差异分析的典型钻孔(图1)。空间测温数据分别以钻20_40、钻12_36与钻27_44记。数据采集使用温度自动记录仪(Temperature Recorder, Madgetech®),每15 min采集一次^[22]。选择火区中心部位热导管散热装置(是德国材料与地质化学研究所(BAM)所设计的地下煤火散热灭火装置。作用原理为,借助导管内外的温压差,导管内部产生的水循环将地下煤火的热量携带出地面,达到降温的效果)旁的监测钻孔作为火区的纵深测温点,在地下40、60、80、100与120 cm处用温度自动记录仪持续记录5个不同深度的温度,分别以V_40、V_60、V_80、V_100和V_120记。

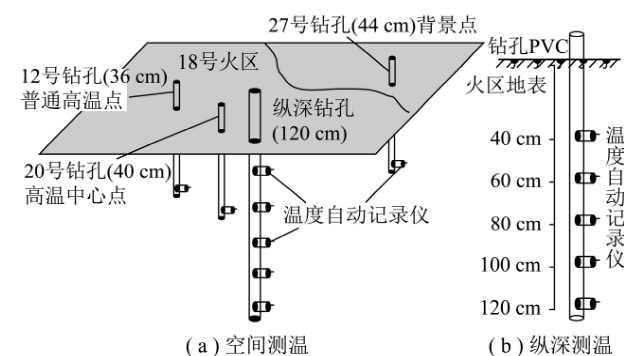


图1 乌达18号火区测温钻孔布置

Fig. 1 Spatial and vertical distribution of the temperature measurement bore holes in fire zone 18 in Wuda

2 方法与数据处理

2.1 标准差

标准差与方差是从平均状况来衡量一组地理数据与平均值的离散程度,标准差是方差的算术平方根^[23],即

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中 σ 为标准差; n 为样本数据; x_i 为样本值; $\bar{x}$ 为样本均值。

计算地下煤火地表浅层纵深测温数据的标准差值,分析地下煤火的浅层温度变化幅度及其与深度的关系。

2.2 相关性分析方法

相关性分析与检验可以测定地理要素之间的相互关系的密切程度。正态分布的等间隔测度的变量 x, y 可以采用 Person 积矩相关公式计算其相关系数

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

其中, $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别表示两个变量样本的平均值,即: $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ 。 r_{xy} 为变量 x 与 y 之间的相关系数,其值介于 $[-1, 1]$ 。 $r_{xy} > 0$ 表示正相关,即两个变量同向相关; $r_{xy} < 0$ 表示负相关,即两个变量异向相关; r_{xy} 的绝对值越接近于 1,表示变量之间的关系越密切;越接近于 0 则越不密切^[23]。本文分别计算地下煤火的浅层测温数据与气温、风速之间的相关系数,以探究与量度地下煤火浅层温度信息与气温、风速之间的关系。由于降水在时间上的间断性,由上述计算的相关系数并不可靠,所以本文在分析时采用对照分析方法,对照序列中典型的降水过程与地下煤火浅层温度的突变过程,量化降水量与浅层温度变化幅度的关系,来间接反应降水过程与地下煤火浅层温度信息之间的关系。同时,对上述测温数据进行均值处理,分别得到小时与日值数据序列,分析煤火地表浅层温度的变化趋势,以揭示地下煤火的燃烧状况。

3 结果分析与讨论

3.1 测温的变化趋势

3.1.1 空间测温

背景区的地表浅层温度在 30°C 左右变化,明显高于气温值,可能仍然受到地下煤火热传导作用的影响。

而火区高温中心点的温度则在 $50 \sim 60^\circ\text{C}$, 高于背景区 30°C 左右(图 2(a))。这使得热红外遥感准确探测与量化地下煤火成为可能。但由于地下煤火燃烧的深度大等原因,地表浅层温度与背景值的差距有时并不明显^[18],相应地,遥感探测的困难就会增大。所选取的火区高温中心点与普通高温点相距在 50 m 左右,但地表浅层的温度相差达到 20°C 左右,说明地下煤火燃烧系统的空间范围并不大,燃烧中心的圈定则成为煤火探测与治理的关键。

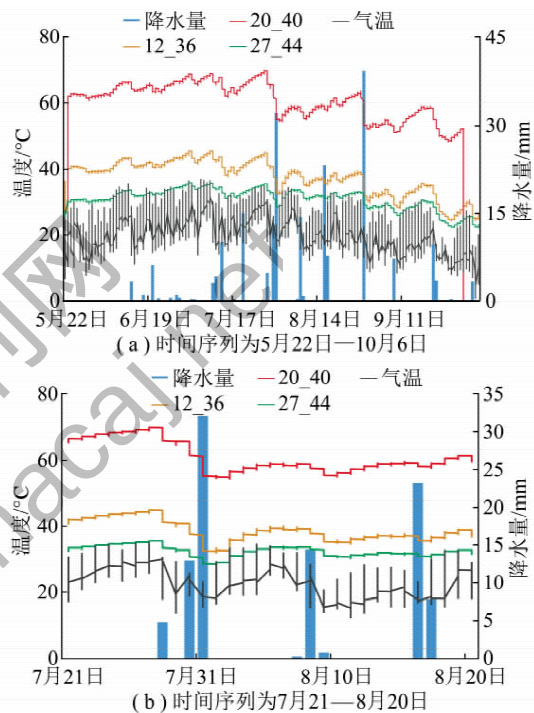


图 2 空间测温与气象要素变化趋势

Fig. 2 Variation of temperature of superficial layer above underground coal fire and meteorological factors

空间测温平均值的时间序列显示(图 2): 高温样本点及背景点的温度变化趋势一致,从 5 月到 7 月底均呈现升高状态,7 月 31 日的降水过程是整个测温序列变化趋势的分水岭,但在随后的近 1 个月的时间内,高温样本点的温度呈现迅速回升的态势,直到 8 月 29 日出现骤降。虽然高温样本点的温度在短期内有明显的升高趋势,但从 7 月底到 10 月份,温度的变化总体呈现下降趋势,这种下降趋势在背景点的温度变化中表现的尤为明显。高温样本点的温度变化幅度要明显大于背景点,表现在每次降温后,火区的高温样本点温度总是迅速升高直到下一次的降低过程,但背景点的温度变化并不是很明显。

3.1.2 纵深测温

纵深测温的变化趋势有别于空间测温,总体呈现降低的趋势,初步推测除受气温季节变化趋势的影响

外, 钻孔旁的热导管散热装置发挥了作用, 所以在 7 月之前 5 个不同深度的温度变化均呈降低趋势(图 3(a))。

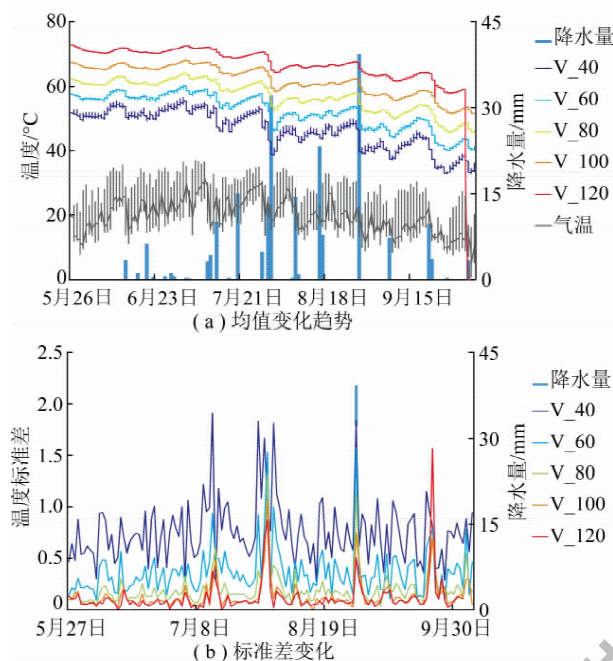


图 3 火区浅层垂深测温与降水量、气温的变化趋势

Fig. 3 Variation of temperature of different vertical layers above underground coal fire and rainfall & air temperature

从纵深测温的变化序列看, 深度的增加与温度的升高有着很好的正相关关系(图 3(a)), 初步推断温度在砂岩中约以 $0.2 \sim 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 的速度变化(40 cm 之下)。据 BGR 的野外报告, 该变化梯度也并非呈线

性, 在表层到 40 cm 之间的温度变化速度可达 $0.77 \sim 0.95\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ (S. Stefan, 乌达煤田 18 号火区测温原数据的校正报告 2009)。地下煤火温度在浅层地表的分布与传导特征有助于建立煤火的温度及能量传导模型, 从而支持遥感技术对煤火地表热异常信息的准确提取与量化^[18](C. Fisher, 煤火 2010 北京会议报告 2010)。但对于不同区域的地下煤火监测与量化研究, 需要对不同的上覆岩层的温度传感特征进行更细致的研究分析。

3.2 降水量对浅层温度的影响

研究区域的降水量在 7 月份以后明显增大, 超过 10 mm 的持续降水过程对地表浅层温度的变化幅度影响明显, 这也体现在对应的纵深测温的标准差值均较大(表 1)。较为明显的几次降水过程发生在 7 月 13 日、7 月 28—31 日、8 月 16—17 日与 9 月 21 日。几乎每次降水过程所对应的测温曲线有明显的降低趋势, 其中几次超过 30 mm 的降水过程对火区浅层温度的影响更为明显(图 2, 图 3(a))。7 月 28—31 日持续的降水过程使得空间与纵深测温均出现了序列中的最大波动。但持续燃烧的地下煤火不断释放热量抵消了雨水的降温作用, 在降水过程结束后迅速升温, 直到下一次降水, 所以在随后的 8 月份的两次 30 ~ 50 mm 的降水过程对浅层温度并没有造成明显的影响(如图 2(b))。进入 9 月, 研究区域气温显著降低, 虽然几次降水过程并不大, 但地下煤火纵深测温的变化显著。

表 1 纵深测温的日变化与 10 mm 以上单次降水过程的关系

Table 1 Relationship between temperature variation of vertical layers and local rainfall above 10 mm

日期	V_40 均值	变幅	V_80 均值	变幅	V_120 均值	变幅	V_40 标准差	V_80 标准差	V_120 标准差	降水量
7-13	50.48	3.83	61.95	2.34	71.36	1.24	1.91	0.43	0.38	10.0
7-20	49.49	-0.57	58.92	-0.36	68.82	-0.18	0.70	0.16	0.05	15.0
7-28	50.10	10.17	61.39	8.51	70.75	6.55	1.83	0.38	0.07	4.8
7-29	48.38	8.45	59.79	6.91	70.24	6.04	1.08	0.28	0.25	0
7-30	46.72	6.79	59.14	6.26	69.14	4.94	1.67	0.50	0.69	13.0
7-31	40.27	0.34	55.67	2.79	65.93	1.73	1.00	1.31	0.87	32.1
8-8	46.32	2.81	56.47	0.79	66.55	0.08	0.63	0.05	0.07	14.4
8-9	43.51	0	55.68	0	66.47	0	0.40	0.39	0.14	0.8
8-16	44.62	-2.31	55.64	-0.18	66.25	0.16	0.28	0.20	0.05	23.2
8-17	45.39	0	55.31	0	66.02	0	1.02	0.17	0.09	7.8
8-29	42.37	2.38	56.14	2.98	65.87	1.05	1.84	1.12	0.51	39.3
9-21	42.34	3.46	53.59	1.52	64.05	0.75	1.15	0.28	0.11	9.6

注: 变幅的计算是以降水当日的浅层温度与本次过程后的最低测温值的差值; 灰色表示连续的降水日。

因雨水在沙岩中的下渗需要一定时间, 降水对浅层温度的影响有一定的滞后, 浅层测温的最低值出现

在降水过程中的最后一日或结束后的下一日。7 月底的降水过程使纵深测温序列中 40 cm 深处的温度

降幅高达 10.17 ℃(表 1),说明降水量对浅层的温度变化具有很大的影响。中国北方冬季降水稀少,越冬的火区地表浅层温度监测结果,受到降水过程的影响较小,会更好地反应地下煤火的燃烧状况。

空间与纵深测温序列中几次明显的波动足以说明:降水量是影响地下煤火浅层温度变化的重要因素,大的降水过程除地表岩层与植物根系的截流作用外,很可能有雨水下渗至地下煤火的燃烧系统内,或者通过火区的构造断裂带及火区的地表裂隙直接渗漏达到煤火燃烧处,达到降温效果;而长年多雨地区,这种下渗作用会抑制地下煤火的发生。

3.3 气温对浅层温度的影响

火区纵深测温与气温的拟合散点图显示:浅层温度与气温之间的拟合关系较好,且随着深度的增加,

拟合程度在降低(图 4)。

研究区域的气候类型属于典型的中温带大陆性气候^[24],具有雨热同期的特点,7 月底同样是该区域气温变化的一个转折点,地下煤火的地表浅层测温受到气温季节变化趋势的影响明显(图 2、3)。相关性分析表明:气温与火区的浅层测温有着良好的相关关系。与空间测温的相关系数可以达到 0.722,且通过 0.01 的置信度检验(表 2)。气温与纵深温度的最佳相关性为钻孔最浅的 40 cm 深处,相关系数可以达到 0.756,随着深度的增加,相关系数在降低,气温与 120 cm 深处温度的相关系数为 0.424,仍能够通过 0.01 的置信度检验(表 3)。这说明,即使在 1 m 以下甚至是更深的深度,也会受到气温的季节变化趋势的影响。

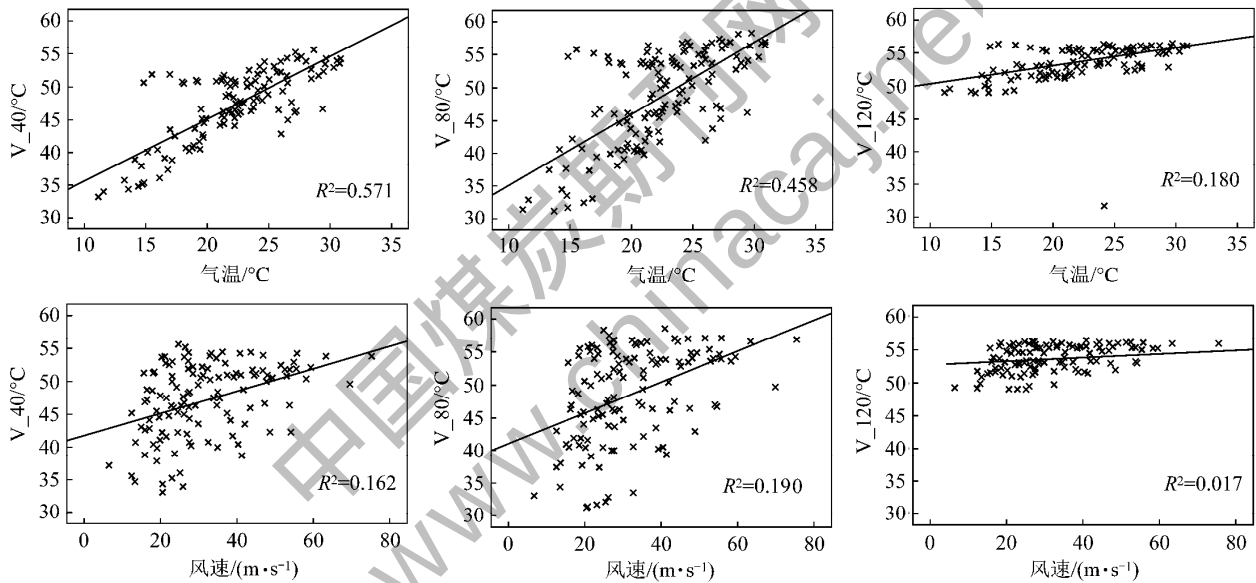


图 4 气温、风速与地下煤火表层纵深温度变化的散点

Fig. 4 Scatter plot between temperature of different vertical layers and meteorological factors

表 2 空间测温与气温、风速的 Person 相关系数

Table 2 Person correlation between temperature of spatial layer and local meteorological factors

	钻 12_36	钻 20_40	钻 27_44	气温	风速
钻 12_36	1	0.914 **	0.945 **	0.807 **	0.451 **
钻 20_40	0	1	0.860 **	0.722 **	0.431 **
钻 27_44	0	0	1	0.845 **	0.400 **
气温	0	0	0	1	0.404 **
风速	0	0	0	0	1

** 相关关系可以通过 0.01 的置信度检验(双尾检验)。

相关性分析的数据取自 5 月 26 日—10 月 1 日共计 129 d 的日数据,其中测温数据、气温与风速取日平均值

相关系数:0.990;置信度:0.144

表 3 同。

表 3 纵深测温与气温、风速的 Person 相关系数

Table 3 Person correlation between temperature of vertical layers and local meteorological factors

	V_40	V_60	V_80	V_100	V_120	气温	风速
V_40	1	0.990 **	0.974 **	0.960 **	0.660 **	0.756 **	0.403 **
V_60	0	1	0.996 **	0.987 **	0.686 **	0.712 **	0.430 **
V_80	0	0	1	0.998 **	0.701 **	0.677 **	0.436 **
V_100	0	0	0	1	0.709 **	0.643 **	0.434 **
V_120	0	0	0	0	1	0.424 **	0.130
气温	0	0	0	0		1	0.404 **
风速	0	0	0	0	0.144	0	1

温度的日变化周期性在空间与纵深测温的变化序列中均有体现,但日变化幅度明显小于气温(图 2(a))。3 个空间钻孔的深度均在 40 cm 左右,所以空间测温的日变化趋势很相近;但在纵深测温的变化趋势中呈现明显的梯度变化,随着深度的增加,日变化幅度不断地变小。从图 3(b)中纵深温度标准差的变化序列中也可以看出,在 40 cm 处标准差序列变化剧烈,随着深度增加,波动在逐渐减小,在 120 cm 以下则非常微弱。可推断在 120 cm 以下深度,气温的日变化趋势对地下煤火地表浅层温度变化的影响微弱;换言之,120 cm 非常接近日间太阳辐射影响地下煤火地表浅层温度变化的最大深度(C. Fisher, 煤火 2010 北京会议报告, 2010),这个深度以下的温度变化更能反应地下煤火的燃烧状况。

可见,气温对于地下煤火的影响只限于浅层,气温的日变化与季节变化趋势对地下煤火的浅层温度变化均有明显的影响。区域长年的高温天气,或是夏季的高温天气对煤层露头发火、矸石堆、储煤堆发火有着重要作用;但对于深层的地下煤火,气温的影响是有限的。对地下煤火燃烧状况进行监测时,剥离了气温及降水量影响的火区地表浅层温度信息将会更加准确地反应燃烧状况。在运用遥感手段探测或监测煤火时,尽量选择夜间或冬季的影像可避开降水过程与气温的干扰,对于地下煤火地表热异常信息的提取与量化更加有利^[18-19]。

3.4 风速对浅层温度的影响

本文侧重于探讨风速对火区浅层温度的影响,关于风向等是否与地下煤火的蔓延方向有关有待于进一步研究。如图 4 火区纵深测温与风速的拟合散点显示:浅层温度与风速之间的拟合关系较好,但劣于气温。与气温一样,随着深度的增加,煤火浅层温度与风速之间的拟合程度也在降低。

研究区域的风速在 5 月到 10 月份期间变化较为

紊乱,但总体呈现降低趋势(图 5)。相关性分析表明,风速与火区的地表浅层测温存在良好的正相关性。风速与空间测温的相关性系数能达到 0.451(表 2);与纵深测温的相关性系数最大值为 0.436,均能通过 0.01 的置信度检验(表 3)。研究区域处于我国西北部典型的半干旱地区,全年风力强劲,夏季高温,沙岩地表对流强烈,容易产生大风天气,风速与气温之间非常好的正相关关系也体现了这一点;但与降水量之间并没有明显的关系。

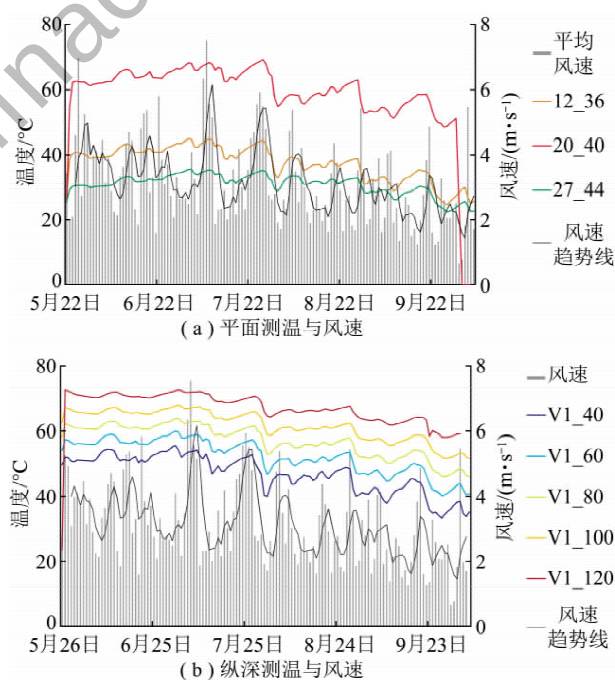


图 5 火区测温与风速变化趋势

Fig. 5 Variation of temperature of different vertical layers above underground coal fire and wind speed

短期的大风天气对地下煤火的影响并不明显,但局地风场可能会影响火区内热量的扩散,同时通过裂隙等通风系统加速地下煤火燃烧系统内部的气体循环。所以在建立地下煤火的地表热量传输模型时,风速是一个必需考虑的因素。长年的大风天气会加快

岩层的风化作用,致使煤层出现露头,增大煤火发火的可能性^[1-2]。

4 结论与展望

(1) 总体上,18 号火区地下煤火的地表浅层温度与气温的季节变化趋势基本上一致,呈现先高后低的趋势;纵深测温因受气温季节变化与热导管散热装置的共同作用,总体呈现降低趋势。纵深测温呈现很好的梯度变化,初步推断火区表层 40 cm 之下的砂岩中温度以 0.2~0.3 °C/cm 的梯度变化;浅层温度的变化具有明显的日变化周期性,随着深度的增加,变化幅度不断地变小。火区高温中心点与背景区的温差达到 30 °C 左右,这使得热红外遥感结合地表物探手段准确探测与量化地下煤火成为可能。高温样本点的温度变化幅度要明显大于背景点,两者距离较小但浅层温度相差较大,推断研究区域的地下煤火燃烧系统的空间范围并不大,燃烧中心的圈定则成为煤火探测与治理的关键。

(2) 降水量是影响地下煤火燃烧的重要因素,强降水过程对火区浅层温度的影响更为明显。较大的降水过程通过下渗作用达到煤火燃烧处,达到降温的效果;而长年多雨的地区,这种下渗作用会抑制地下煤火的发生。

(3) 气温对于地下煤火的影响只限于浅层,气温日变化与季节变化趋势对地下煤火浅层温度变化均有明显的影响。在 120 cm 深度以下的温度变化更能反映地下煤火的燃烧状况。区域长年的高温天气,或是夏季的高温天气对浅层煤层发火有着重要作用;但对于深层的地下煤火,气温的影响是有限的。

(4) 相关性分析表明,风速与火区的浅层温度存在良好的正相关关系。短期的大风天气对地下煤火的影响并不明显,但局地风场可能会影响火区内热量的扩散,同时通过裂隙等通风系统加速地下煤火燃烧系统内部的气体循环。长期的大风天气影响岩石风化,会对地下煤火产生间接的影响。

上述数据取自夏秋季节的数据,气温的季节变化影响很显著,越冬的火区地表浅层温度监测结果,最大限度地抑制气温与降水的影响,可更好地反映地下煤火的燃烧状况。监测地下煤火的燃烧状态的变化趋势,可以用剥离了气温及降水量影响的火区地表浅层温度信息来反映燃烧状况。气象条件对地下煤火的影响受限于燃烧的深度,浅层地下煤火受到气象条件的影响较大,而深层的地下煤火则受地质构造等因素的影响更大些。在对地下煤火的风险进行评估时,风力也是一个重要的气候因素,局地风场与区域风力

变化对于地下煤火的燃烧的作用机理仍待细致地分析研究。

感谢审稿专家对文章提出宝贵修改意见;感谢德国宇航中心 Fisher Christian 先生提供浅层温度测量数据;感谢乌海气象局提供相关气象资料;感谢北京师范大学减灾与应急管理研究院作者所在研究小组对文章提出的修改意见。

参考文献:

- [1] 管海晏,冯·亨特伦,谭永杰,等.中国北方煤田自燃环境调查与研究[M].北京:煤炭工业出版社,1998.
Guan Haiyan, J L van Ganderen, Tan Yongjie, et al. Investigation and research on coalfields environment of spontaneous combustion in Northern China [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1998.
- [2] 武建军,刘晓晨,蒋卫国,等.新疆地下煤火风险分布格局探析[J].煤炭学报,2010,35(7):1164-1171.
Wu Jianjun, Liu Xiaochen, Jiang Weiguo, et al. Spatial analysis of risk for underground coal fire in Xinjiang, China [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(7): 1164-1171.
- [3] 张建民.中国地下煤火研究与治理[M].北京:煤炭工业出版社,2008.
Zhang Jianmin. Underground coal fires in China: origin, detection, fire-fighting and prevention [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2008.
- [4] Stracher G B, Finkelman R B. Coal fires research activities in the U. S.: a brief history [A]. Proceedings of Second International Conference on Coal Fire Research (ICCFR2) [C]. DBB Forum Berlin, Germany, 2010: 38-43.
- [5] Stracher G B, Taylor T P. Coal fires burning out of control around the world: thermodynamic recipe for environmental catastrophe [J]. International Journal of Coal Geology, 2004, 59: 7-17.
- [6] DLR, Coal Fire Research-A Sino-German Initiative. World map of coal fires. [EB/OL]. http://www.coalfire.caf.dlr.de/projectareas/world_wide_distribution_en.html 2010-07-22.
- [7] Sinha A, Singh V K. Spontaneous coal seam fires: a global phenomenon in international research for sustainable control and management [A]. ERSEC Ecological Book Series-4 [C]. Beijing: Tsinghua University Press and Springer Verlag, 2005: 42-66.
- [8] Rozanski Z, Wrona P. Fires of mine waste dumps and connected hazards for the environment, polish experiences [A]. Proceedings of Second International Conference on Coal Fire Research (ICCFR2) [C]. DBB Forum Berlin, Germany, 2010: 52-58.
- [9] Donat A, Bauer S, Ruter H. The moster coal fire-exploration and extinction of a fire in a closed coal mine, bosnia-herzegovina [A]. Proceedings of Second International Conference on Coal Fire Research (ICCFR2) [C]. DBB Forum Berlin, Germany, 2010: 46-51.
- [10] Kresta F, Hajovsky J. Long-term temperature monitoring of the EMA tip in Ostrava (Czech Republic) [A]. Proceedings of Second International Conference on Coal Fire Research (ICCFR2) [C]. DBB

- Forum Berlin ,Germany 2010: 106 – 109.
- [11] Bekker C D. Spontaneous combustion at a south african opencast colliery [A]. Proceedings of Second International Conference on Coal Fire Research(ICCFR2) [C]. DBB Forum Berlin ,Germany , 2010: 25.
- [12] 武建军 ,蒋卫国 ,刘晓晨 ,等. 地下煤火探测、监测与灭火技术研究进展[J]. 煤炭学报 2009 ,34(12) : 1 669 – 1 674.
Wu Jianjun ,Jiang Weiguo ,Liu Xiaochen ,et al. Innovative technologies for exploration ,monitoring and extinction of underground coal fires [J]. Journal of China Coal Society 2009 ,34(12) : 1 669 – 1 674.
- [13] Pone J D N ,Hein K A A ,Stracher G B ,et al. Potential environmental and health impacts of burning coal in Witbank coalfield ,South Africa ,in international research for sustainable control and management [A]. ERSEC Ecological Book Series-4 [C]. Beijing: Tsinghua University Press and Springer Verlag 2005: 94 – 102.
- [14] Wu J J ,Liu X C ,Jiang W G ,et al. Index system of coal fire risk assessment [A]. EOGC Proceedings of the 2nd International Conference on Earth Observation for Global Changes [C]. 2009: 1 406 – 1 412.
- [15] 张建民 ,管海晏 ,Rosema A. 煤田火区遥感四层空间探测方法 [J]. 国土资源遥感 2004 ,15(4) : 50 – 53.
Zhang Jianmin ,Guan Haiyan ,Rosema A. Study on four-level remote sensing detection system for underground coal fire monitoring [J]. Remote Sensing for Land and Resources 2004 ,15(4) : 50 – 53.
- [16] 孔 冰 ,马建伟 ,陈汉章 ,等. 3S 技术在乌达煤矿水灾危险评估中的应用 [J]. 国土资源遥感 2010 ,21(2) : 80 – 85.
Kong Bing ,Ma Jianwei ,Chen Hanzhang ,et al. The application of 3S technology to the assessment of the flood risk in the Wuda Coal mine ,inner Mongolia [J]. Remote Sensing For Land & Resources , 2010 ,21(2) : 80 – 85.
- [17] Künzer C. Demarcating coal fire risk areas based on spectral test sequences and partial unmixing using multi-sensor remote sensing data [D]. Vienna ,Austria: Vienna University of Technology 2005.
- [18] Anke Tetzlaff. Coal fire quantification using ASTER ,ETM and BIRD satellite instrument data [D]. Munich: Ludwig-Maximilians-University 2004.
- [19] Zhang J. Spatial and statistical analysis of thermal satellite imagery for extraction of coal fire related anomalies [D]. Austria: Technical University of Vienna 2004.
- [20] 周继奋. 内蒙古自治区贺兰山北段煤田 – 乌达矿区秦海士井田最终(精查) 重新勘探地质报告说明书 [R]. 呼和浩特: 内蒙古自治区煤炭工业管理局煤田地履勘探公司一四七队 ,1964.
- [21] Jia Y. Fire Fighting engineering as a challenge in Wuda(China) [A]. Proceedings of Second International Conference on Coal Fire Research(ICCFR2) [C]. DBB Forum Berlin ,Germany ,2010: 295 – 296.
- [22] Schloemer S. Field report and preliminary results on gas and temperature measurements in Wuda Coal field 12. 5 – 29. 5. 2008 [R]. BGR 2008.
- [23] 徐建华. 现代地理学中的数学方法 [M]. 北京: 高等教育出版社 ,1998.
Xu Jianhua. Mathematic methods in the modern geography [M]. Beijing: Higher Education Press ,1998.
- [24] 刘明光. 中国自然地理图集 [M]. 北京: 中国地图出版社 ,1998.